



TITLE:

酸化ガリウムのホモエピタキシャル成長とn型ドーピングに関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

佐々木, 公平

CITATION:

佐々木, 公平. 酸化ガリウムのホモエピタキシャル成長とn型ドーピングに関する研究. 京都大学, 2016, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2016-07-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r13043>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2017-07-01に公開; 許諾条件により本文は2018-10-01に公開

京都大学	博士（ 工 学 ）	氏名	佐々木 公平
論文題目	酸化ガリウムのホモエピタキシャル成長と n 型ドーピングに関する研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、単斜晶系の酸化ガリウム（$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$）について、$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板上へのホモエピタキシャル成長の特性と高品質化、およびドーピングによる電気特性制御について、新しいパワーデバイスへの応用を目指す観点から行った研究をまとめたもので、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、酸化ガリウムの材料物性から、省エネルギー効果の大きいパワーデバイスにつながる特質を持つことを指摘するとともに、従来の研究結果を概観し、デバイスにつながる品質の結晶膜の育成、ドーピング制御技術、局所的ドーピング技術の研究開発が必要であることを述べ、本研究の目的を明確にしている。</p> <p>第 2 章では、分子線エピタキシャル法を用いた成長において、成長速度と欠陥生成について基板面方位依存性を子細に調べ、最適な基板面方位について検討した結果を述べている。(100)面のみ特異的に成長レートが低く、これは強い劈開性に起因することを述べている。さらに、b 軸回転面よりも c 軸回転面の方が、40%程度成長レートが高い結果を見出している。また、(101)面および$(\bar{2}01)$面付近では容易に結晶欠陥が発生し、それが対称性の高い酸素の六方稠密面上で生じる Ga 原子の配列異常起因することを見出している。これらの結果から、(100)、(101)、$(\bar{2}01)$面から離れた面が成長に適しており、(010)面が特に好ましいと指摘している。</p> <p>第 3 章では、$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ $(\bar{2}01)$面上特有の$(\bar{2}01)$面ツインの発生について、成長条件で抑制しうるものかどうかを明らかにすることを目的として、成長条件と基板オフ角との関係から検討した結果を述べている。その結果、成長温度や VI/III 比を大きく変化させてもツインの抑制は困難であることを示し、[010]方向に 7° 以上、もしくは[010]直行方向に 15° 以上という非常に大きなオフ角を設けることで、ツインを抑制できることを見出している。そして、このようにツインの抑制が困難な理由として、その発生機構が一般的な積層欠陥とは異なり、ごく一部の Ga 原子の配列異常によって容易に生じるためであることを指摘し、デバイス応用を目指す結晶成長には$(\bar{2}01)$面から離れることが望ましく、その観点で(010)面が適していることを提言している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	佐々木 公平
<p>第4章では、デバイス品質の Ga_2O_3 ホモエピタキシャル膜の実現を目的として、Ga_2O_3 (010)基板上での成長条件の最適化を行った結果を述べている。アンドープ膜の表面モフォロジーと成長条件の関係から、付着原子の表面拡散が重要な機構であることを見出し、成長温度ごとに VI/III 比を最適化することで、原子レベルで平坦な膜を成長できることを示している。また、$3\text{ }\mu\text{m/h}$ を超える高速成長が可能なことを実証している。また、n 型ドーピングのために成長中に Sn のドーピングを行うと、Sn が表面に吐き出されるという問題を見出し、この問題を酸素供給量を増すことで克服している。これにより、$10^{16}\sim 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 台にわたるキャリア(電子)密度制御を達成している。また、Sn のドナー準位は 77 meV 程度であることを見出している。</p> <p>第5章では、局所的ドーピングを目指して、Sn および Si のイオン注入による n 型ドーピングを行った結果を述べている。Sn を注入イオン種に用いた場合、平均注入濃度 $1\times 10^{19}\sim 1\times 10^{20}\text{ cm}^{-3}$ の範囲では数%程度の低い活性化率しか得られなかったのに対し、Si を注入イオン種に用いた場合には、平均注入濃度 $1\times 10^{17}\sim 5\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ の広い範囲に亘って、50~80%の高い活性化率を達成したことを示している。そして、Sn と Si で活性化率に大きな違いが生じる理由として、Ga_2O_3 へのそれぞれのイオンの固溶限界に起因している可能性を指摘している。また Si 高濃度注入層に対して、Ti/Au 電極を用いて、$4.6\times 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ という十分低いオーミック電極を実証して、これがデバイス化に大きく貢献することを提言している。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、研究成果の波及効果および今後の展開について提言を行っている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、単斜晶系の酸化ガリウム ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) について、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板上へのホモエピタキシャル成長の特性と高品質化、およびドーピングによる電気特性制御について、新しいパワーデバイスへの応用を目指す観点から行った研究をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 分子線エピタキシャル法を用いた成長において、成長速度と欠陥生成について基板面方位依存性を子細に調べ、結晶成長過程に関する考察を踏まえて、(010)面が最も適していることを見出した。
2. $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ($\bar{2}01$)面上に特有の($\bar{2}01$)面ツインの発生について、成長条件と基板オフ角との関係から調べ、成長条件による抑制は困難で、 7° 以上のオフ角を設けることが解決策であることを見出した。しかし容易にツイン面が発生するため、デバイス応用を目指す結晶成長には(010)面が望ましいことを提言した。
3. デバイス品質の Ga_2O_3 ホモエピタキシャル膜の実現を目的として、 Ga_2O_3 (010)基板上での成長条件の最適化を行った。アンドープ膜の表面モフォロジーと成長条件の関係から、付着原子の表面拡散が重要な機構であることを見出し、これを最適化することで、原子レベルで平坦な膜を成長できることを示した。また、 $3\text{ }\mu\text{m/h}$ を超える高速成長が可能なことを実証した。
4. n型ドーピングのために成長中に Sn のドーピングを行うと、Sn が表面に吐き出されるという問題を見出した。この問題を酸素供給量を増すことで克服し、 $10^{16}\sim 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 台にわたるキャリア(電子)密度制御を達成した。また、Sn のドナー準位は 77 meV 程度であることを見出した。
5. Si のイオン注入による n型ドーピングを行い、平均注入濃度 $1\times 10^{17}\sim 5\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ の広い範囲に亘って、 $50\sim 80\%$ の高い活性化率を達成した。また Ti/Au 電極を用いて、 $4.6\times 10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$ という十分低いオーミック電極を実証して、これがデバイス化に大きく貢献することを提言した。

以上、本論文は、酸化ガリウムの特質を明らかにして、新しい半導体デバイスにつながる基盤技術を築いたもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年6月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。